

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625551>

Оригинальное исследование

Методика сравнения различных форм лезвия плоских ножей роторного культиватора

А.Б. Кудзаев¹, Р.В. Калагова²¹ Горский государственный аграрный университет, Владикавказ, Российская Федерация;² Северо-Осетинская государственная медицинская академия, Владикавказ, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В процессе обработки почвы, плоские ножи роторных культиваторов должны осуществлять процесс резания почвы и сорняков с минимальной энергоёмкостью и не забиваться сорной растительностью, что обусловлено соответствием параметров их лезвий условиям эксплуатации. Однако, несмотря на обилие работ, посвященных исследованию рабочего процесса плоских ножей роторных культиваторов, отсутствует методика, позволяющая провести сравнительную оценку различных форм их лезвий.

Цель работы — разработка методики сравнения различных форм лезвия плоских ножей роторных культиваторов.

Методы. Дизайн исследования предусматривал изучение вопросов: уточнение условия схода сорняков с криволинейного лезвия плоского ножа, совершающего плоскопараллельное движение; определение уравнения кривой лезвия ножа, удовлетворяющего условию схода сорняков с лезвия; разработку методов сравнительного анализа энергоёмкости процесса резания почвы плоскими ножами с лезвиями различной формы; экспериментальную проверку теоретических положений.

Объектами исследования являлись процессы взаимодействия сорняков и почвы с лезвиями плоских ножей различной формы. Исследования проводились в течение 2022 и 2023 годов.

Результаты. Уточнено условие схода сорняков с криволинейного лезвия плоского ножа (более информативная форма записи), совершающего плоскопараллельное движение, опираясь на которое, получено уравнение рациональной кривой лезвия. Разработана комплексная методика сравнения различных форм лезвий плоских ножей роторных культиваторов, по критериям соблюдения условия схода сорняков с лезвия и энергоёмкости резания почвы. Приведены примеры применения методики для анализа различных форм лезвий плоских ножей роторных культиваторов и создания одной из эффективных форм, а также результаты экспериментальных исследований.

Заключение. Предложенная методика позволяет дать конкретные практические рекомендации по целесообразности использования ножей той или иной формы в рассматриваемых условиях эксплуатации с учетом режимных параметров работы машин, а также создавать эффективные комбинированные лезвия.

Ключевые слова: нож роторного культиватора; форма лезвия ножа; условие схода сорняков с лезвия ножа; методика сравнения различных форм лезвий.

Как цитировать:

Кудзаев А.Б., Калагова Р.В. Методика сравнения различных форм лезвия плоских ножей роторного культиватора// Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 3. С. 317–330. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625551>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625551>

Original Study Article

The method for comparing different blade shapes of flat knives of a rotary cultivator

Anatoly B. Kudzaev¹, Rita V. Kalagova²

¹ Gorsky State Agrarian University, Vladikavkaz, Russian Federation;

² North Ossetian State Medical Academy, Vladikavkaz, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: In the process of tillage, flat knives of rotary cultivators are to carry out the process of cutting soil and weeds with minimal energy consumption and not to become clogged with weeds, which is due to the compliance of the parameters of their blades with operating conditions. However, despite the abundance of works devoted to the study of the working process of flat knives of rotary cultivators, there is not any method of a comparative assessment of the various shapes of their blades.

AIM: Development of the method for comparing different blade shapes of flat knives of rotary cultivators.

METHODS: The research design included studying the following issues: clarifying the conditions for weeds to fall off the curved blade of a flat knife performing a plane-parallel movement; determining the equation of the curve of a knife blade that satisfies the condition of weeds to fall off the blade; development of methods for comparative analysis of the energy intensity of the process of cutting soil with flat knives with blades of various shapes; experimental verification of theoretical conceptions. The study objects were the processes of interaction of weeds and soil with the blades of flat knives of various shapes. The studies were conducted during 2022 and 2023.

RESULTS: The condition for weeds to fall off the curved blade of a flat knife performing a plane-parallel movement has been clarified (a more informative form of notation), based on which an equation for the rational curve of the blade has been obtained. The comprehensive method has been developed for comparing different shapes of blades of flat knives of rotary cultivators, according to the criteria of compliance with the condition of weeds to fall off the blade and the energy intensity of soil cutting. Examples of the application of the method for the analysis of various shapes of blades of flat knives of rotary cultivators and the development of one of the effective shapes, as well as the results of experimental studies are given.

CONCLUSION: The proposed method helps to give specific practical recommendations on the advisability of using knives of one shape or another in the operating conditions under consideration, taking into account the operating parameters of the machines, as well as to create effective combined blades.

Keywords: the blade of a rotary cultivator; the shape of the knife blade; the condition for the weeds to fall off the knife blade; a method for comparing different shapes of blades.

To cite this article:

Kudzaev AB, Kalagova RV. The method for comparing different blade shapes of flat knives of a rotary cultivator. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(3):317–330. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-625551>

Received: 11.01.2024

Accepted: 29.07.2024

Published online: 30.07.2024

ВВЕДЕНИЕ

По данным агентства «Maximize Market Research» мировой рынок роторных культиваторов в 2022 году составил 534,82 млн. долларов и ожидается, что к 2029 году он достигнет 812,18 млн. долларов [1].

Основными рабочими органами машин, указанного типа, являются ножи, монтируемые на вращающемся валу. Если форма лезвия ножей выбрана неудачно, то они забиваются частями растений, а сам процесс резания почвы характеризуется повышенными энергозатратами.

Поиску рациональной формы лезвия ножей роторных культиваторов посвящено множество работ. Так, в почвообрабатывающей машине Б.С. Сексона (1893 г.) было предложено два типа ножей: сплошные спиралеобразные и отдельные ножи с криволинейной режущей кромкой [2]. Позднее, американские специалисты рекомендовали форму режущей кромки ножа в виде эвольвенты [3].

Большой вклад в теорию проектирования ножей роторных культиваторов внесли японские ученые, под руководством J.Sakai [4–6]. Ими была разработана методика проектирования ножей с режущей кромкой в виде спирали Архимеда, что на практике позволило избежать забивания их лезвий растительными остатками. Эта теория в сжатом виде приведена в работе JuJ-S [7].

Большое внимание J.Sakai уделял проектированию рационального профиля плоского ножа, из которого впоследствии создавался пространственный профиль. Как следует из этих работ, углубление изучения вопроса взаимодействия сорняков с криволинейным лезвием позволяет существенно дополнить методику проектирования ножей роторных культиваторов.

Теория взаимодействия рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой непрерывно совершенствуется и позволяет решать многочисленные практические задачи [8–10]. Однако, выбор наименее энергоемких ножей осуществляется сегодня, в основном, путем экспериментального подбора наиболее рациональной их формы [11–13], что связано с отсутствием удобного метода анализа различных форм лезвия.

Большой вклад в теорию резания почв, различных объектов сельскохозяйственного производства, пищевой и перерабатывающей промышленности внесли отечественные ученые. К числу первых работ, имеющих важное методологическое и практическое значение, относятся труды академика В.П. Горячкина, в которых он исследовал подпорное резание соломы и плодовых ветвей [14, 15]. В указанных работах он продемонстрировал важность выбора формы лезвия плоского ножа для получения наименее энергозатратного вида резания — скользящего.

Основные положения теории резания различных материалов изложены в трудах Н.Е. Резника и Ю.П. Зыбина [16, 17] и творчески развиваются в исследованиях современных ученых, например [18].

Применительно к роторным почвообрабатывающим машинам глубокие исследования изложены в работе Ф.М. Канарева [19].

П.И. Гаджиевым изучался рабочий процесс обработки почвы фрезой, оснащенной зубчатыми ножами [20], а методика проектирования крыла Г-образного ножа фрезы разработана М.Н. Чаткиным и коллегами [21].

В.А. Николаевым предложена методика расчета сил и моментов сопротивления резанию грунта серповидным ножом, осуществляющим зажатое резание [22]. Методика расчета сил сопротивления резанию почвы прямым лезвием плоского ножа разработана Ю.В. Константиновым [23].

Как видно из вышеизложенного, существующие теоретические исследования направлены на изучение какого-то одного вида лезвия ножей. Наличие комплексной методики сравнения различных форм лезвия плоских ножей роторных культиваторов, позволяет определить наиболее рациональную форму, оптимально соответствующую условиям эксплуатации машины и создавать новые эффективные конструкции.

Данная статья является продолжением исследований, изложенных в [24].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка методики сравнения различных форм лезвия плоских ножей роторных культиваторов.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Дизайн исследования предусматривал изучение следующих вопросов: уточнение условия схода сорняков с криволинейного лезвия плоского ножа, совершающего плоскопараллельное движение; определение уравнения кривой лезвия ножа, удовлетворяющего условию схода сорняков с лезвия; разработку методов сравнительного анализа энергоемкости процесса резания почвы плоскими ножами с лезвиями различной формы; экспериментальную проверку теоретических положений.

Критерии соответствия

Разработанная методика использовалась для сравнения лезвий плоских ножей с режущей кромкой в виде прямой линии, спирали Архимеда, эксцентричной окружности и предложенной кривой. Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными и результатами исследований других ученых.

Продолжительность исследования

Исследования проведены в Горском государственном аграрном университете в 2022–2023 гг.

Методы регистрации исходов

В ходе экспериментальных исследований изучался крутящий момент, возникающий при резании почвы, на валу лабораторной установки, закреплённым на нем исследуемым ножом. Регистрация значений момента проводилась тензометрическим методом при помощи тензорезисторов, наклеенных на поворачивающий вал рычаг и соединённых через усилитель Zetlab 411 и аналого-цифровой преобразователь Zetlab 210 с ноутбуком.

Статистический анализ

Принципы расчёта размера выборки: Размер выборки предварительно не рассчитывался.

Методы статистического анализа данных: экспериментальные данные подвергались статистической обработке по программам, составленным на основании ГОСТов и методической литературы. В процессе обработки вычислялись: среднее арифметическое, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент вариации, ошибка среднего арифметического, относительная ошибка среднего арифметического, расчётное значение критерия Стьюдента, доверительный интервал. Предельное значение относительной ошибки среднего арифметического 5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Взаимодействие с почвой и сорняками лезвия плоского ножа, совершающего плоскопараллельное движение.

Пусть нож совершает вращательное движение вокруг точки O (рис. 1а) с угловой скоростью ω , а точка O перемещается со скоростью движения машины \vec{v}_M . Нож имеет лезвие AB и ножку OA , которая крепится к валу фрезы радиусом r_{bl} . Кромка AB лезвия в полярной системе координат описывается выражением $r = f(\theta)$, где r — радиус вектор; θ — угол поворота радиуса вектора. Начальное значение длины радиус-вектора $|OA| = r_A$, конечное $|OB| = r_B$. Лезвие AB ножа контактирует с частицей почвы или сорняка (далее объектом) в точке i . Абсолютная скорость \vec{v}_{ai} точки i представляет собой сумму векторов окружной скорости \vec{v}_{oi} и скорости \vec{v}_M . Вектор \vec{v}_{ai} отклонён от вектора \vec{v}_{oi} на угол γ_i . Проведя в точке i касательную mm' к лезвию отметим угол τ_i между ней и радиус-вектором r_i .

Лезвие воздействует на рассматриваемый объект с результирующей силой \vec{R}_i , которую раскладываем на две составляющие — нормальную силу \vec{N}_i , отклонённую от силы \vec{R}_i на угол трения φ и направленную по нормали к касательной mm' , и силу трения $\vec{F}_{тр}$, направленную по касательной mm' . Угол между силой \vec{R}_i и вектором скорости \vec{v}_{ai} обозначим ψ_i , а угол между силой \vec{N}_i и вектором \vec{v}_{ai} обозначим ξ_i .

Левее точки i , параллельно вектору \vec{v}_{ai} проведём прямую nn' , точку пересечения которой с касательной mm' обозначим E .

Воздействие криволинейного лезвия на объект в точке i можно рассматривать как воздействие

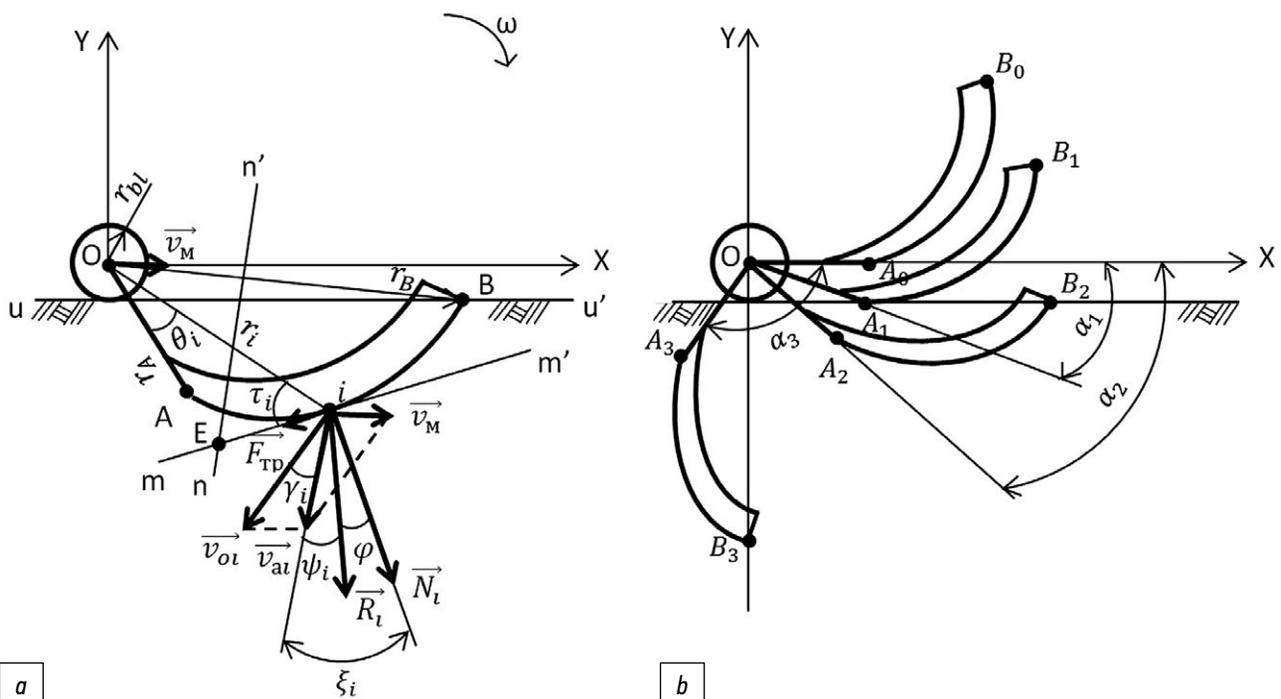


Рис. 1. Схемы к анализу взаимодействия криволинейного лезвия с объектом: *a* — схема скоростей объекта и действующих на него сил; *b* — основные фазы работы лезвия.

Fig. 1. Diagrams for analyzing the interaction of a curved blade with an object: *a* — the diagram of the object's velocities and the forces acting on it; *b* — the main phases of the blade operation.

клина $n'Em'$. Обозначим величину угла $n'Em'$ как $\alpha_{кли}$. Тогда, известное условие перемещения частицы по поверхности клина:

$$\alpha_{кли} < \frac{\pi}{2} - \varphi.$$

Из рис. 1а видно, что

$$\alpha_{кли} = \frac{\pi}{2} - \tau_i + \gamma_i.$$

Подставив последнее выражение в вышестоящее, получим

$$\tau_i > \varphi + \gamma_i. \tag{1}$$

Если анализируется процесс взаимодействия лезвия с почвой, то $\varphi = \varphi_n$ и условие (1) примет вид:

$$\tau_i > \varphi_n + \gamma_i. \tag{2}$$

При взаимодействии лезвия с сорняками $\varphi = \varphi_c$. Тогда

$$\tau_i > \varphi_c + \gamma_i. \tag{3}$$

Выражение (3) является условием схода сорняков с поверхности криволинейного лезвия.

Так как почти всегда $\varphi_c > \varphi_n$, то при выполнении условия (3) выполняется и (2).

Угол τ_i , входящий в условия (2) и (3) находится из выражения:

$$\tau_i = \text{arctg} \left(\frac{r_i}{r'_{\theta i}} \right), \tag{4}$$

где $r'_{\theta i}$ — значение производной выражения для радиус-вектора по углу θ в точке i .

Угол поворота ножа α_n отсчитываем от оси X (см. рис. 1b).

Стремясь получить максимальную глубину обработки h_{\max} , фермеры заглубляют фрезу не на разность $r_B - r_A$, а до касания вала с ножами поверхности поля, то есть

$$h_{\max} = r_B - r_{bl}. \tag{5}$$

В начальный момент времени, когда $\alpha_n = 0$, точка A_0 лезвия расположена на оси X . При повороте ножа на угол $\alpha_n = \alpha_{n1}$, точка A_0 переходит в точку A_1 , в которой происходит касание лезвия с почвой и начинается фаза заглубления ножа. Заглубление продолжается до перехода точки B_1 в точку B_2 , при этом $\alpha_n = \alpha_{n2}$ и наступает фаза резания почвы всем лезвием.

Пусть резание почвы всем лезвием продолжается пока точка A_2 не перейдет в точку A_3 и угол поворота ножа станет равным $\alpha_n = \alpha_{n3}$.

Формулы для расчёта значений углов α_{n1} , α_{n2} и α_{n3} :

$$\alpha_{n1} = \arcsin \left(\frac{r_{bl}}{r_A} \right), \tag{6}$$

$$\alpha_{n2} = \arcsin \left(\frac{r_{bl}}{r_B} \right) + \theta_p, \tag{7}$$

$$\alpha_{n3} = \frac{\pi}{2} + \theta_p, \tag{8}$$

где θ_p — угол раствора ножа (угол между радиус-векторами r_A и r_B).

Абсолютная скорость точки i :

$$v_{ai} = \sqrt{v_{oi}^2 + v_i^2 - 2v_{oi}v_m \sin(\alpha_n - \theta_i)}, \tag{9}$$

а значение угла γ_i :

$$\gamma_i = \arccos \left(\frac{v_{oi}^2 + v_{ai}^2 - v_m^2}{2v_{oi}v_{ai}} \right). \tag{10}$$

В процессе резания почвы лезвием максимальные значения угла γ имеют место в момент касания почвы рассматриваемой точкой.

Условие (3) графически представлено на рис. 2а из которого видно, что при постоянном значении угла φ_c зависимость между углами γ и τ и θ нелинейная.

Таким образом, чтобы проверить выполнение условия (3), необходимо знать значения параметров v_m , ω , r_{bl} , r_A , r_B , функцию $r = f(\theta)$.

Уравнение краевой кривой лезвия плоского ножа, удовлетворяющее условию схода с него сорняков

Из уравнения (4), опустив индекс i , можем получить зависимость:

$$\frac{dr}{r} = \text{ctg} \tau \cdot d\theta. \tag{11}$$

Выражение (11) является исходным дифференциальным уравнением кривой, описывающей режущую кромку ножа.

Пусть функция $\text{ctg} \tau$ изменяется по закону прямой линии (см. рис. 2с), что, за исключением начальной и конечной точек лезвия, обеспечивает выполнение условия (3) с запасом:

$$\text{ctg} \tau = A_c + k\theta, \tag{12}$$

где A_c — значение функции при $\theta = 0$; k — коэффициент, равный тангенсу угла наклона прямой к оси θ .

Как видно из рис. 2с значение k можно определить из выражения:

$$k = \frac{\text{ctg} \tau_B - \text{ctg} \tau_A}{\theta_p}.$$

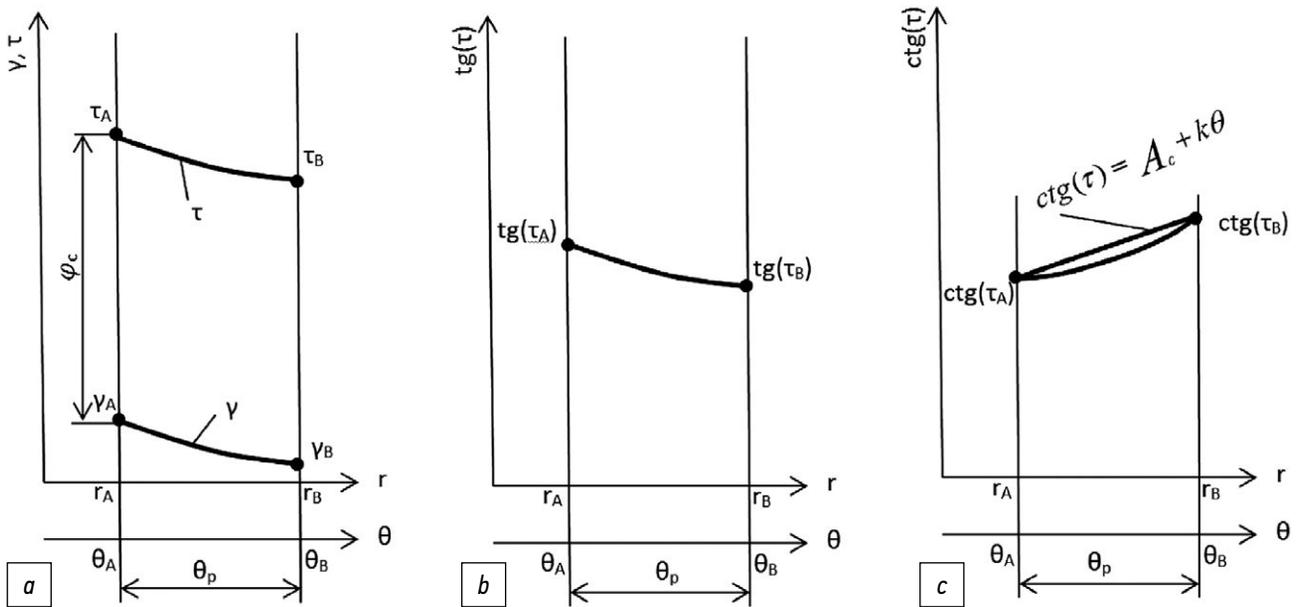


Рис. 2. Изменение угла τ и значений $\operatorname{tg} \tau$ и $\operatorname{ctg} \tau$ в точке касания лезвия с почвой в фазе заглибления ножа: *a* — изменение углов γ и τ ; *b* — график функции $\operatorname{tg} \tau$; *c* — график функции $\operatorname{ctg} \tau$.

Fig. 2. Change of the angle τ and values of $\operatorname{tg}(\tau)$ and $\operatorname{ctg}(\tau)$ at the contact point of the blade with the soil in the phase of deepening the knife: *a* — changing the angles γ and τ ; *b* — graph of the function $\operatorname{tg}(\tau)$; *c* — graph of the function $\operatorname{ctg}(\tau)$.

Подставив (12) в (11) и проинтегрировав получившееся выражение, получим:

$$\ln r = A_c \theta + \frac{k\theta^2}{2} + C, \quad (13)$$

где C — постоянная интегрирования.

Значение A_c определяется из выражения:

$$A_c = \operatorname{ctg} \tau_A - k\theta_A.$$

Вспользуемся начальными условиями: при $\theta = \theta_A$ значение $r = r_A$. Известным является и значение r_B . Подставив начальные условия в (13), получим:

$$\theta_p = \frac{2(\ln r_B - \ln r_A)}{\operatorname{ctg} \tau_A + \operatorname{ctg} \tau_B}, \quad r = e^{\left(\operatorname{ctg} \tau_A \cdot \Delta\theta + \frac{k}{2}\Delta\theta^2 + \ln r_A\right)}, \quad (14)$$

где $\Delta\theta = \theta - \theta_A$.

Выражение (14) является уравнением режущей кромки плоского ножа почвообрабатывающей машины, лезвие которого соответствует условию схода с него сорняков (3).

Зависимость момента сопротивления резанию почвы лезвием плоского ножа от его формы

Метод 1.

Опираясь на работы [16, 17], определим выражения для расчёта момента M_c сопротивления резанию почвы.

Нож фрезы содержит режущую кромку 1 (рис. 3а), фаску 2, плоскость 3 и ножку 4 при помощи которой он крепится к валу 5. Силы сопротивления, действующие на плоскость ножа 3, учитывать не будем.

Вырежем элемент режущей кромки длиной dl вместе с фаской лезвия (см. рис. 3б) и приложим к ним элементарные силы. На режущую кромку AB действуют нормальная сила $dN_{кр}$ и сила трения $dF_{кр}$, а на фаску элементарного участка — нормальная сила $dN_{ф}$ и сила трения $dF_{ф}$. Считая нож жёстким и прочно закреплённым, действием сил, действующих со стороны почвы на участок $ACDB$ (см. рис. 3б) пренебрегаем.

Введём обозначения: t_l — толщина лезвия; $t_{кр}$ — толщина режущей кромки; $t_{ф}$ — толщина фаски; $\beta_{ф}$ — угол наклона фаски; $\beta'_{ф}$ — трансформированный угол наклона фаски в точке E ; $b_{ф}$ — ширина фаски; $r_{кр}$ — радиус режущей кромки; $k_{кр}$ — коэффициент увеличения размера материала деформируемого кромкой, рекомендуемый на основании исследований, изложенных в работе [16]. По нашим данным, для тонких плоских ножей при $t_{кр} = 0,1-0,2$ мм коэффициент $k_{кр} = 8 \div 10$. При увеличении $t_{кр}$ значения $k_{кр}$ изменяются. Соответственно $t_{ф} = t_l - k_{кр}t_{кр}$.

Точка приложения сил $dN_{ф}$ и $dF_{ф}$ находится на поверхности фаски, на удалении от грани AB равно $\frac{2}{3}b_{ф}$. Фаска сминает объем почвы $dV_{см}$:

$$dV_{см} = \frac{t_{ф}}{4}r^2 d\theta - \frac{t_{ф}}{4}r_1^2 d\theta,$$

где $r_1 = r - \frac{b_{ф}}{\sin \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{r}{r'} \right) \right]}$.

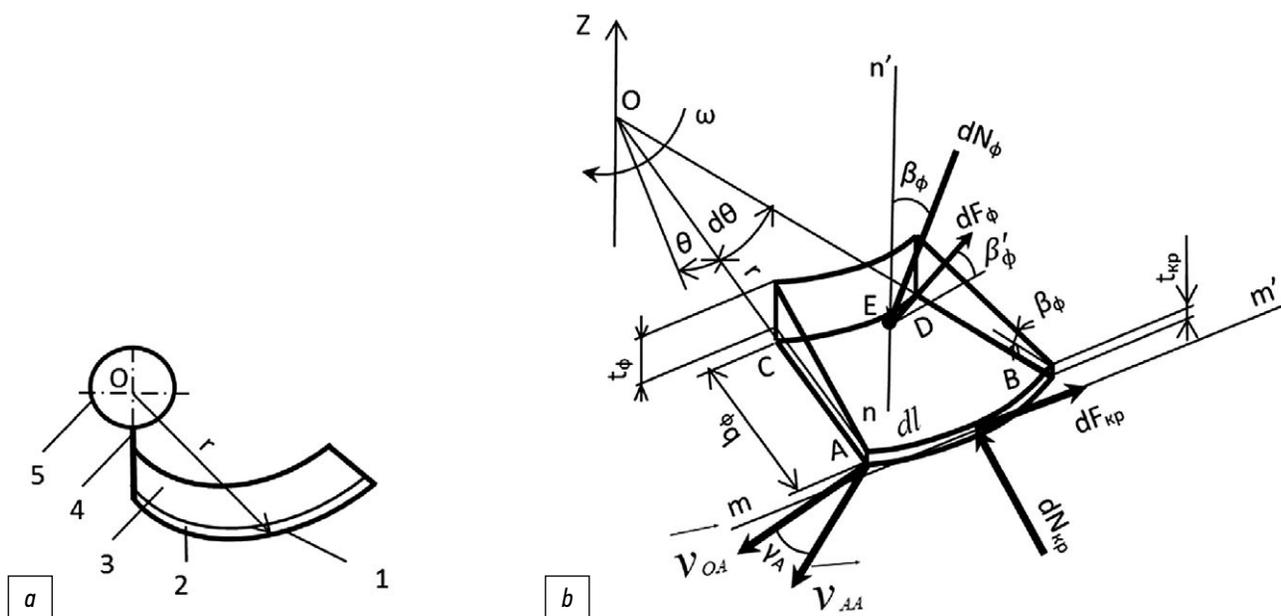


Рис. 3. Схемы к расчёту момента сопротивления резанию почвы криволинейным лезвием: *a* — составные части ножа; *b* — силы, приложенные к элементарному участку лезвия.

Fig. 3. Diagrams for calculating the moment of resistance to cutting the soil with a curved blade: *a* — the components of the knife; *b* — the forces applied to the elementary section of the blade.

Сила dN_ϕ определится как произведение $dV_{см}$ на коэффициент смятия q_1 .

Момент dM_{N_ϕ} от горизонтальной проекции силы dN_ϕ :

$$dM_{N_\phi} = q_1 \frac{t_\phi}{4} (r^2 - r_1^2) \left(r - \frac{2b_\phi}{3 \sin \tau} \right) \sin \beta_\phi \cos \tau d\theta$$

Момент dM_{F_ϕ} от проекции на горизонтальную плоскость силы dF_ϕ в направлении абсолютной скорости точки *E*:

$$dM_{F_\phi} = dN_\phi \operatorname{tg} \varphi_{II} \cos \left[\operatorname{arctg} \left(\cos (\tau - \gamma_E) \operatorname{tg} \beta_\phi \right) \right] \cdot \left(r - \frac{2b_\phi}{3 \sin \tau} \right) \cos \gamma_E d\theta$$

Значение угла γ_E определяется аналогично значению γ_A .

Профессор Н.Е. Резник, ссылаясь на работу Г.А. Комарова, рекомендует учитывать кинематическую трансформацию лезвия [16]. С ее учетом, выражение для момента $dM_{N_{кр}}$:

$$dM_{N_{кр}} = 2\sigma_{см} k_{кр} r_{кр} \cos (\tau - \gamma_A) r r'_\theta d\theta$$

Момент $dM_{F_{кр}}$ от силы $dF_{кр}$:

$$dM_{F_{кр}} = \operatorname{tg} \varphi_{II} 2\sigma_{см} k_{кр} r_{кр} \cos (\tau - \gamma_A) r^2 d\theta$$

При заданных значениях углов поворота θ_A и θ_B , радиус-вектора r (см. рис. 1), значение суммарного момента сопротивления лезвия M_{c1} :

$$M_{c1} = \int_{\theta_A}^{\theta_B} dM_{N_{кр}} + \int_{\theta_A}^{\theta_B} dM_{F_{кр}} + \int_{\theta_A}^{\theta_B} dM_{N_\phi} + \int_{\theta_A}^{\theta_B} dM_{F_\phi}$$

Метод 2.

Рассмотрим бесконечно малый элемент криволинейного тонкого плоского лезвия длиной dl с распределённой по режущей кромке нагрузкой q_N (рис. 4).

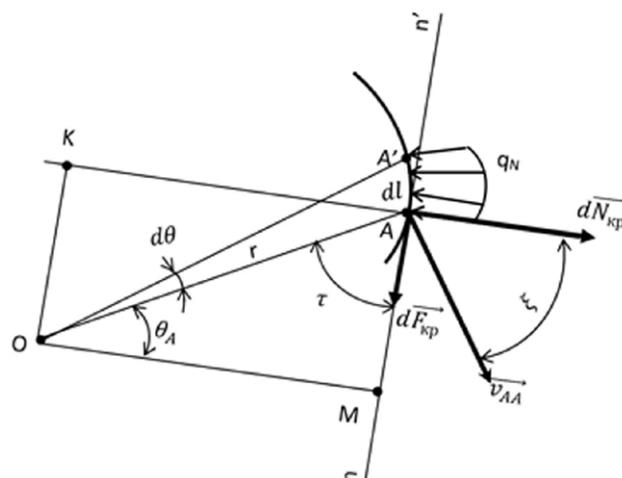


Рис. 4. Схема к определению момента сопротивления резанию почвы по методу 2.

Fig. 4. The diagram for determining the moment of resistance to cutting the soil according to the method 2.

Сила $dN_{кр}$ равна произведению q_N на dl , а момент $dM_{N_{кр}}$ относительно точки O :

$$dM_{N_{кр}} = q_N r \cos \tau \cdot dl. \quad (15)$$

Известно, что

$$dl = \sqrt{(r'_\theta)^2 + r^2} \cdot d\theta, \quad (16)$$

а $\cos \tau$ можно выразить следующим образом

$$\cos \tau = \cos \left[\arctg \left(\frac{r}{r'_\theta} \right) \right] = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{r'_\theta} \right)^2}}. \quad (17)$$

Подставив (16) и (17) в (15) и взяв интеграл в пределах от θ_A до θ_B , получим выражение для расчёта момента $M_{N_{кр}}$:

$$M_{N_{кр}} = \int_{\theta_A}^{\theta_B} q_N r r'_\theta \cdot d\theta.$$

Аналогично получаем формулу для расчёта момента $M_{F_{кр}}$:

$$M_{F_{кр}} = \operatorname{tg} \varphi_{\Pi} \int_{\theta_A}^{\theta_B} q_N r^2 \cdot d\theta.$$

По результатам наших экспериментов зависимость между нагрузкой q_N , выраженной в долях от максимального значения (т.е. $q_N \in [0 \dots 1]$), и значениями угла ξ

(см. рис. 1) в промежутке $\xi \in \left[0 \dots \frac{\pi}{2} \right]$ можно выразить в виде:

$$q_N = 0,9987 + 0,0935\xi - 0,8116\xi^2 + 0,2209\xi^3. \quad (18)$$

В итоге, выражение для расчёта значения M_{c2} :

$$M_{c2} = \left(0,9987 + 0,0935\xi - 0,8116\xi^2 + 0,2209\xi^3 \right) \cdot \left[\int_{\theta_A}^{\theta_B} r r'_\theta \cdot d\theta + \operatorname{tg} \varphi_{\Pi} \int_{\theta_A}^{\theta_B} r^2 \cdot d\theta \right].$$

Пример 1. Анализ некоторых форм лезвия.

Исходные данные: число оборотов вала ротора культиватора $n = 200$ об/мин; поступательная скорость машины $v_M = 2,5$ км/ч; радиус вала фрезы (см. рис. 1) $r_{bl} = 0,035$ м; радиус $r_A = 0,12$ м; радиус $r_B = 0,235$ м; угол $\varphi_{\Pi} = 26,56^\circ$; угол $\varphi_c = 45^\circ$.

Анализируемые формы лезвия:

- прямое

$$r = \frac{r_A}{\cos \theta},$$

- спираль Архимеда

$$r = a_{сп} \theta,$$

где $a_{сп}$ — параметр спирали;

- эксцентричная окружность

$$r = \sqrt{e^2 + R_{ок}^2 - 2eR_{ок} \cos \left[\theta - \arcsin \left(\frac{e}{R_{ок}} \sin \theta \right) \right]},$$

где e — эксцентриситет окружности радиусом $R_{ок}$;

- предлагаемая форма (формула (14)).

При анализе прямого лезвия полагаем $\theta_A = 0$.

Для проведения расчётов по спирали Архимеда задаём значение угла раствора ножа, например, $\theta_p = 65^\circ$. Далее, по формуле $a_{сп} = (r_B - r_A) / \theta_p$ определяем значение параметра спирали, а затем углов θ_A и θ_B .

Для эксцентричной окружности, если построить графики функций $\tau = f(\theta)$ и $r = f(\theta)$, то можно увидеть, что минимальное значение угла τ наблюдается при вертикальном расположении радиуса $R_{ок}$. Далее, при увеличении θ значение угла τ возрастает, а прирост значений радиус-вектора r уменьшается. Расчёты показывают, что с ростом глубины обработки почвы, не всегда возможно обеспечить выполнение условия (3) для всего лезвия.

Важно: условие (3) должно соблюдаться для всего лезвия.

Расчёты проводили в программе MS Excel. Некоторые результаты приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что наихудшие условия для схода сорняков имеет прямолинейное лезвие, а лучшие — предложенное.

В начале лезвия в виде спирали Архимеда условие схода сорняков выполняется несколько лучше, чем у лезвия в виде эксцентричной окружности.

Для того чтобы оценить адекватность методов 1 и 2 и провести обоснованную оценку энергоёмкости анализируемых форм, значения недостающих для расчёта параметров, примем в соответствии с условиями последующей экспериментальной проверки: напряжение $\sigma_{см} = 541,4$ кПа; коэффициент смятия $q_1 = \sigma_{см} / 0,04 = 13,54 \cdot 10^6$ Н/м³; $t_{л} = 0,003$ м; угол $\beta_{\phi} = 25^\circ$; $t_{кр} = 0,0002$ м; $k_{кр} = 8$.

Часть ножа, расположенная ближе к концу лезвия, величиной $0,07 \div 0,1$ м, интенсивнее всего взаимодействует с необработанной почвой. В связи с этим, расчёт моментов сопротивления и экспериментальную проверку результатов проведём для участка ножа $r \in [0,165 \dots 0,235]$ м, а ввиду последующего экспериментального изучения резания почвы в статике примем, что $n = 10$ об/мин, $v_M = 0,001$ км/ч.

Для проведения расчётов было разработано 8 программ на языке программирования VBA с модулями численного решения интегралов методом Симпсона.

Таблица 1. Результаты анализа сравниваемых криволинейных лезвий на соблюдение условия схода с них сорняков
Table 1. The results of the analysis of the compared curved blades for compliance with the conditions of weeds falling off them

№ п/п	Угол повор., ножа $\alpha_{п}$, град	Характеристики лезвия в точке А				Характеристики лезвия в точке i						Фаза
		Абс., скор., v_{AA} , м/с	Угол γ_A , град	Угол ξ_A , град	$\xi_A > \varphi_c (+)$ $\xi_A < \varphi_c (-)$	Радиус r_i , м	Угол θ , град	Абс., скор., v_{Ai} , м/с	Угол γ_i , град	Угол ξ_i , град	$\xi_i > \varphi_c (+)$ $\xi_i < \varphi_c (-)$	
Контроль (прямое лезвие) $r = r_A / \cos \theta$												
1	16,9	2,4	16	74	+	0,12	0	2,4	16	74	+	3 ¹
2	35	2,19	15,1	75	+	0,127	19	2,56	15,2	55,9	+	3
3	50	2,03	12,7	77,3	+	0,149	36,4	3,04	12,9	40,7	-	3
4	67,9	1,89	8	82,1	+	0,235	59,3	4,87	8,1	22,6	-	Рвл ²
5	95	1,82	1,9	88,1	+	0,235	59,3	4,55	7,1	23,6	-	Рвл
6	149,3	2,24	15,5	74,6	+	0,235	59,3	4,23	0	30,7	-	Рвл
Спираль Архимеда $r = a_{сп} \theta$												
7	84,8	2,4	16	33,8	-	0,12	67,8	2,4	16	33,8	-	3
8	110	2,11	14,1	35,6	-	0,165	93	3,31	11,6	46,8	+	3
9	115	2,06	13,3	36,6	-	0,173	98	3,49	10,9	48,7	+	3
10	149,8	1,83	3,1	46,7	+	0,235	133	4,77	8,0	58,7	+	Рвл
11	190	1,96	10,8	39	-	0,235	133	4,36	4,9	61,7	+	Рвл
12	231,2	2,41	16,1	33,8	-	0,235	133	4,24	1,38	65,2	+	Рвл
Эксцентричная окружность $r = (e^2 + R_{ок}^2 - 2eR_{ок} \cos(\theta - \arcsin(e / R_{ок} \sin \theta)))^{0,5}$												
13	16,3	2,42	16,0	37,1	-	0,120	90	2,42	16,0	37,1	-	3
14	40	2,23	13,8	38,6	-	0,165	114	3,33	11,6	43,6	-	3
15	60	2,04	9,8	49,3	+	0,204	134	4,13	9,28	53,9	+	3
16	81,3	1,93	3,1	49,2	+	0,235	155	4,79	8,02	66,8	+	Рвл
17	125	2,08	11	41,4	-	0,235	155	4,35	4,58	70,1	+	Рвл
18	171,3	2,6	15,3	37,1	-	0,235	155	4,27	2,62	72,1	+	Рвл
Предложенная кривая $r = e^{(\text{ctg } \tau_0 \Delta \theta + 0,5k \Delta \theta^2 + \ln r_A)}$												
19	16,9	2,4	13,8	45	+	0,12	0	2,4	13,8	45	+	3
20	33,5	2,24	13	45,9	+	0,15	20	3,06	11	45,2	+	3
21	50,5	2,08	10,5	48,3	+	0,192	40	3,95	8,6	45,1	+	3
22	63,9	1,99	7,62	51,1	+	0,235	55,4	4,87	6,99	44,9	-	Рвл
23	103,9	1,94	4,28	54,5	+	0,235	55,4	4,49	5,04	46,8	+	Рвл
24	143,9	2,21	12,7	48,7	+	0,235	55,4	4,32	0,17	51,7	+	Рвл

3¹ — заглупление лезвия; Рвл² — резание всем лезвием

Экспериментальная проверка результатов расчёта примера 1.

Нами было изготовлено 5 ножей с изучаемыми формами лезвий. Плоскость ножа 3 (см. рис. 3а) вырезалась,

а фаска усиливалась r -образным ребром жёсткости толщиной 2 мм.

Ножи крепились болтами на закреплённый на кронштейне подшипниковый узел, вал которого приводился

во вращение динамометрическим ключом с наклеенными на него фольговыми тензорезисторами. Сигнал от тензорезисторов последовательно поступал в усилитель Zet-411, аналогово-цифровой преобразователь Zet-210, ноутбук. Считанные с осциллограмм максимальные значения моментов сопротивления резанию обрабатывались методами математической статистики.

Исследования проводили в лабораторных и полевых условиях.

В лаборатории, в почвенный канал был засыпан выщелоченный чернозём, предварительно просеянный через сито с диаметром отверстий 5 мм. После каждой серии замеров, вся почва разрыхлялась, а затем утрамбовывалась грузом с зафиксированным весом. Расстояние от краёв канала до следа лезвия было не меньше 15 см, а от заглубленного на максимальную глубину лезвия до дна канала — не менее 20 см.

Перед каждой серией опытов измерялась твёрдость почвы и определялся угол трения почвы о сталь.

В серии полевых экспериментов резание почвы проводили на максимально возможную глубину, что, помимо изучения моментов сопротивления, позволяло оценить засорённость каждого лезвия растительными остатками. Агротехнический фон — пашня.

Для определения коэффициентов выражения (18) в лабораторных условиях был проведён отдельный опыт.

Для этого были изготовлены 5 прямых односторонних лезвий шириной 0,03 м и углами раствора 0°, 15°, 30°, 45°, 60°. Остальные параметры соответствовали параметрам примера 1.

К верхней части каждого лезвия приваривался стержень, который вставлялся в направляющие лабораторной установки. Затем установка вместе с лезвием ставилась на предварительно уплотнённую почву и, при помощи консольной балки, закреплённой на ползуне и перемещающейся вместе с ним вертикально, осуществлялось нажатие на стержень. На балку были наклеены

тензорезисторы, сигнал с которых поступал через усилитель Zet-411, аналогово-цифровой преобразователь Zet-210 в ноутбук. Считанные осциллограммы обрабатывались в программе MS Excel. Значение результирующей силы при угле раствора 0° было принято за единицу. Коэффициентами выражения (18) являлись коэффициенты линии тренда графика функции $q_N = f(\xi)$.

В каждой серии опытов определялся угол трения.

Результаты расчётов и лабораторных исследований приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, максимальное значение момента сопротивления резанию почвы наблюдается при исполнении лезвия в виде прямой линии.

Лезвия в виде Спирали Архимеда и эксцентричной окружности также эффективны и по результатам эксперимента обеспечили приблизительно одинаковое снижение момента сопротивления резанию — на 23,8%.

Предлагаемые лезвия по сравнению с прямыми имели снижение момента сопротивления резанию: по варианту 4 — на 11,27%; по варианту 5 — на 24%.

На основании данных, приведённых в табл. 2, можно сделать вывод, что метод 2 точнее отражает влияние формы лезвия на снижение момента сопротивления резанию почвы.

Полевые эксперименты показали, что лезвия, выполненные по вариантам 2–5 (см. табл. 2), значительно реже засорялись остатками растительности, чем прямое (вариант 1). Результаты полевых опытов хорошо согласуются с данными табл. 1.

Пример 2. Создание комбинированного лезвия.

На базе расчётов примера 1 создадим экономичную форму лезвия.

Построим кривые рассмотренных форм лезвия и совместим их точки A (рис. 5а). Из рисунка видно, что предложенная кривая 4 пересекает спираль Архимеда

Таблица 2. Расчётные и экспериментальные максимальные значения моментов сопротивления резанию почвы на глубину 0,07 м сравниваемыми лезвиями

Table 2. Calculated and experimental maximal values of the moments of resistance to cutting the soil to a depth of 0.07 m with the compared blades

Вид лезвия	Максимальное значение момента сопротивления M_c			Сравнение значения M_c с контрольным		
	по методу 1 M_{c1} Нм	по методу 2 M_{c2} отн. ед.	Эксп. значение M_{c3} Нм	$\frac{M_{c1}}{M_{c3}}$, %	$\frac{M_{c2}}{M_{c3}}$, %	$\frac{M_{c2}}{M_{c1}}$, %
Прямое лезвие (контроль)	13,81	0,01498	13,58	100	100	100
Спираль Архимеда	11,72	0,01143	10,26	84,87	76,26	75,55
Эксцентричная окружность	11,73	0,01142	10,33	84,94	76,21	76,07
Предлагаемое $\varphi_c = 45^\circ$, $\theta_p = 58,8^\circ$	13,54	0,01423	12,05	98,04	94,97	88,73
Предлагаемое $\varphi_c = 55^\circ$, $\theta_p = 83,5^\circ$	12,63	0,01284	10,32	91,45	85,72	76,0

в точке K . Для спирали Архимеда выполнение условия (3) в точке K необходимо проверить. Значение радиус-вектора в точке K составляет $R_K \approx 0,1868$ м. По формулам (4)–(10) определяем: $\text{tg}\tau_K = \theta_K = 1,846$ рад; $\alpha_n = 2,143$ рад; $\gamma_K = 0,1768$ рад. При $\varphi_c = 0,785$ рад условие (3) выполняется.

В итоге, мы получаем экономичную форму лезвия, полностью удовлетворяющую условию (3). Примерная конструкция ножа изображена на рис. 5б.

По результатам расчёта, при $n = 200$ об/мин, $v_M = 2,5$ км/ч данное лезвие, по сравнению с прямым,

при резании почвы на максимальную глубину, обеспечивает снижение момента сопротивления резанию от 5,64% (по методу 1), до 15,1% (по методу 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Предложенная методика заключается в проверке выполнения условия (3) для всей режущей части каждого анализируемого лезвия и расчёте значений моментов

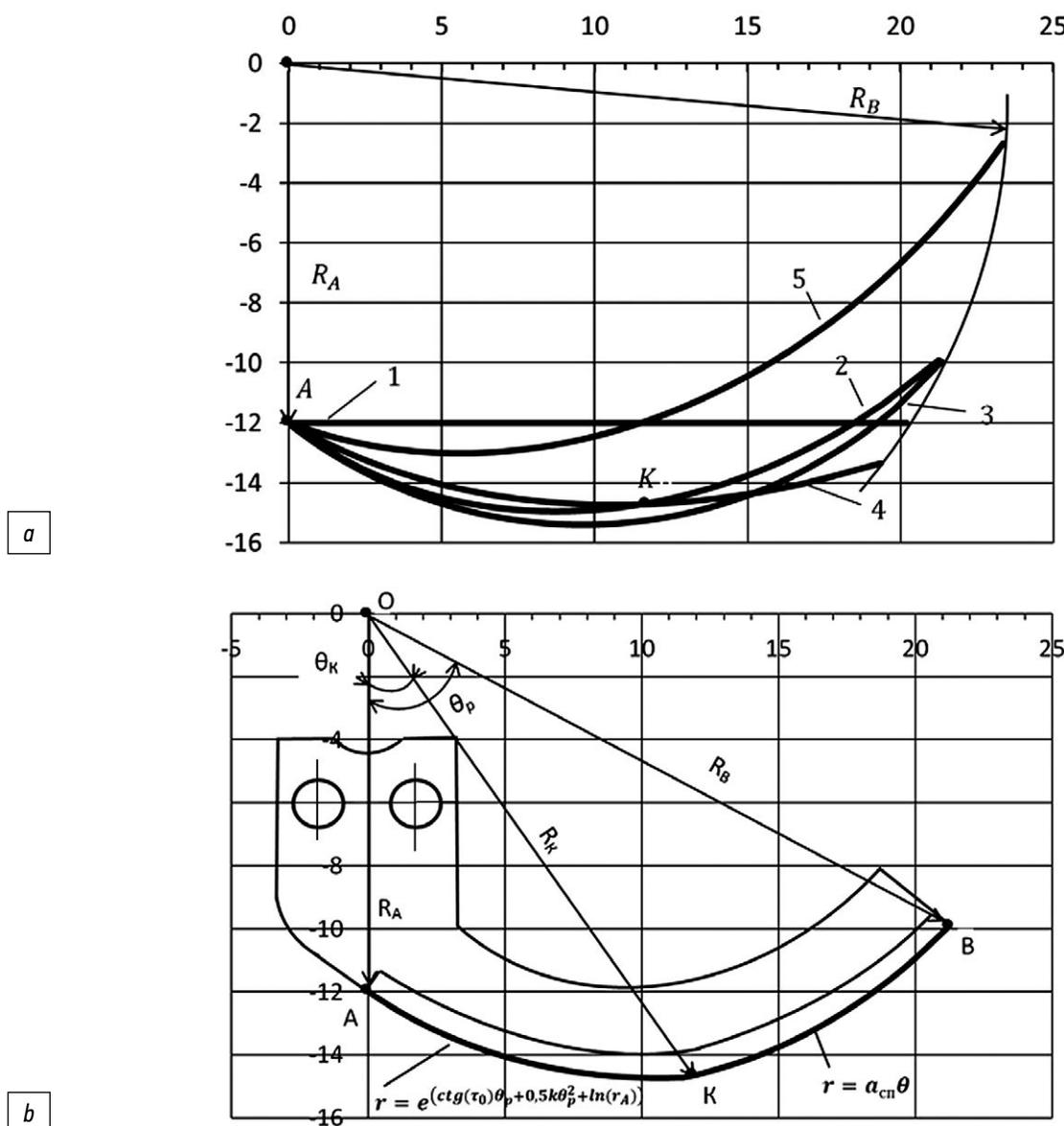


Рис. 5. Схемы к рассмотренным примерам: a — формы краевых кривых анализируемых лезвий; b — энергосберегающий нож с комбинированной кромкой; 1 — прямая линия; 2 — спираль Архимеда; 3 — эксцентричная окружность; 4 — предложенная кривая ($\varphi_c = 45^\circ$); 5 — предложенная кривая ($\varphi_c = 55^\circ$).

Fig. 5. Diagrams for the considered examples: a — shapes of the edge curves of the analyzed blades; b — energy-saving knife with a combined edge; 1 — straight line; 2 — the Archimedes spiral; 3 — an eccentric circle; 4 — the proposed curve $\varphi_c = 45^\circ$; 5 — the proposed curve $\varphi_c = 55^\circ$.

сопротивления резанию почвы с последующим сравнением между собой. Для проектирования новых, эффективных лезвий предложено уравнение рациональной кривой лезвия (14) и приведён пример создания комбинированного лезвия.

Основные результаты исследования

В отличие от условия схода сорняков, используемого в работе [7], условие (3) отражает специфику криволинейного лезвия (угол τ) и параметры, обусловленные его кинематическим режимом работы (угол γ), что делает его более удобным для анализа криволинейного лезвия плоского ножа совершающего плоскопараллельное движение.

Сравнивая полученное уравнение рациональной кривой лезвия ножа (14) с выражением разработанным J. Sakai, можно определить его достоинства и недостатки. Первым достоинством является возможность определения угла раствора ножа θ_p на стадии проектирования, что очень удобно. Вторым преимуществом, является применение уравнения прямой для расчёта значений $\text{ctg}\tau$, что позволяет рассчитать их с некоторым запасом. В то же время, это является и недостатком формулы (14), так как в отличие от метода J. Sakai, несколько снижает строгость анализа.

Как следует из рис. 2а, формула (14) и уравнение, полученное J. Sakai, являются одними из возможных, рациональных случаев реализации условия (3).

Метод 1 определения момента сопротивления сил резанию почвы даёт возможность изучить влияние на процесс резания физико-механических свойств почвы и важнейших параметров лезвия: толщины режущей кромки, толщины лезвия, угла его заточки и т.д.

Метод 2 уступает по содержательности методу 1, но он основан на результатах экспериментальных работ, реализованных в зависимости $q_N = f(\xi)$, и для ряда кривых обеспечивает более высокую точность расчётов.

В целом, оба метода взаимно дополняют друг друга.

Ограничения исследования

На наш взгляд, основные ограничения следующие:

- процесс резания почвы изучался без учёта реально существующей зависимости между скоростью перемещения лезвия и величиной возникающих сил сопротивления резанию;
- в формулах метода 1 заложена линейная зависимость между шириной кромки и размером поперечного сечения деформируемого лезвием слоя почвы, которая при других значениях $t_{кр}$ может быть иной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная выше методика сравнения форм лезвий плоских ножей роторных культиваторов,

позволяет дать конкретные практические рекомендации по целесообразности использования ножей той или иной формы в рассматриваемых условиях эксплуатации с учетом режимных параметров работы машин, а также создавать эффективные комбинированные лезвия.

При разработке лезвий плоских ножей роторных почвообрабатывающих машин желательно учитывать положение В.П. Горячкина, утверждающее для кривой, описывающей лезвие, необходимость иметь увеличивающиеся значения угла τ при увеличении угла поворота θ радиус-вектора r , что отражается на снижении величины суммарного момента сил сопротивления резанию. Это особенно важно для создания на базе вышеприведённых разработок эффективных пространственных лезвий, работающих с небольшой подачей на нож, что имеет место у большинства современных машин.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. А.Б. Кудзаев — написание текста рукописи; редактирование текста рукописи; Р.В. Калагова — поиск публикаций по теме статьи; создание изображений, создание программ для проведения расчётов, проведение расчётов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (авторы прочитали и одобрили финальную версию рукописи перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовки публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Author's contribution. A.B. Kudzaev — search for publications, writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript, creating images; R.V. Kalagova — search for publications on the topic of the article; creation of images, creation of programs for calculations, making calculations. The authors confirm their authorship compliance with the international criteria of ICMJE (all authors made a significant contribution to the conceptualization, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Competing interests. The authors declare, that there is no conflict of interest.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rotary Cultivator Market-Industry Analysis and Forecast 2023-3039: by Blade, Power, End-User, and Region [internet] Дата обращения: 7.11.2023. Режим доступа: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-rotary-cultivator-market/71467/#>
2. Sexson B.S. Land-Pulverizer. Patent US503006A. Patented August 8, 1893. Дата обращения: 7.11.2023. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US503006A/en>
3. Johnson C.N., Stephenson W.H., Nash J.H. Rotor blade for rotary cultivators. Patent US2679200, Patented May 25, 1954. Дата обращения: 7.11.2023. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US2679200A/en>
4. Sakai J. Theoretical Approach to the Hand Tractor of Rotary Tillage // JARQ. 1974. Vol. 8. № 3. P. 153–158. Дата обращения: 7.11.2023. Режим доступа: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/08-3-153-158_0.pdf
5. Sakai J. Designing Process and Theories of Rotary Blades for Better Rotary Tillage (Part 1) // JARQ. 1978. Vol. 12, N 2. P. 86–93. [дата обращения: 28.02.2023] Доступ по ссылке: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/12-2-086-093_0.pdf
6. Sakai J., Shibata J., Tagushi T. Design Theory of Edg-Curves for Rotary Blades of Tractors // Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 1976. Vol. 38, N 2. P. 183–190. doi: 10.11357/jsam1937.38.183
7. Ju J-S, Luan J-M, Cheng C-W. Trajectory Angles and Cultivating Dynamics for Tiller Blades // Journal of Agricultural Machinery. 2004. Vol. 13, N. 1. P. 1–15. doi: 10.30062/JAM.200403.0001
8. Mc Keys E. Soil Cutting and Tillage. NewYork:Elsevier, 1985.
9. Karmakar S. Numerical Modeling of Soil Flow and Pressure Distribution on a simple Tillage Tools using Computational Fluid Dynamics. [Internet]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 2005. Дата обращения: 7.11.2023. Режим доступа: https://harvest.usask.ca/bitstream/handle/10388/etd-10282005-081153/PhD_Thesis_KARMAKAR_Subrata.pdf?sequence=1&isAllowed=y
10. Aluko O.B. Finite element aided brittle fracture force estimation during two-dimensional soil cutting // Int. Agrophysics. 2008. Vol. 22. P. 5–15 Дата обращения: 7.11.2023. Режим доступа: <http://www.international-agrophysics.org/pdf-106465-37307?filename=Finite%20element%20aided.pdf>
11. Hongbo Z., Hongwen L., Shaochun M., et al. The Effect of Various Edge-Curve Types of Plain-Straight Blades for Strip Tillage Seeding on Torque and soil Disturbance using DEM // Soil and Tillage Research. 2020. Vol. 202. P.104674. doi: 10.1016/j.still.2020.104674
12. Chertkiattipol S., Nivamapa T. Variations of torque and specific tilling energy for different rotary blades // International Agricultural Engineering Journal. 2010. Vol. 19, No. 3. P. 1–14. doi: 10.1016/j.still.2020.104674
13. Yuan Y., Wang J., Zhang X., Zhao S. Study on Tillage Resistance and Energy Consumption of a Plain strait Rotary Blade for Strip Tillage // Engenharia Agrícola. 2023. Vol. 43. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43n2e20220127/2023
14. Горячкин В.П. Теория соломорезки и силосорезки. В кн.: Собрание сочинений: в 3-х т. М.: Колос, 1968. Т.3.С. 68-113.
15. Горячкин В.П. Теория ручных ножниц и основные принципы их построения. В кн.: Собрание сочинений: в 3-х т. М.: Колос, 1968. Т.3. С. 120–133.
16. Резник Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975.
17. Зыбин Ю.П. Технология изделий из кожи. Москва: Лёгкая индустрия, 1975.
18. Кравцова Е.В. Совершенствование аппарата и процесса квазистатической резки плодовоовощного сырья на части. дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2017. EDN: HNKQNV
19. Канарев Ф.М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М.: Машиностроение, 1983.
20. Гаджиев П.И., Славкин В.И., Алексеев А.И., и др. Исследование работы почвообрабатывающей фрезы с зубчатым лезвием ножей // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. 2020. № 1 (95). С. 14–18. doi: 10.34677/1728-7936-2020-1-14-18
21. Драняев С.Б., Чаткин М.Н., Корявин С.М. Моделирование работы винтового Г-образного ножа почвообрабатывающей фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2017. Т. 84, № 7. С. 13–19. doi: 10.17816/0321-4443-66315
22. Николаев В.А. Анализ циклического резания грунта // Вестник СибАДИ. 2019. Т. 16, № 6. С. 642–657. doi: 10.26518/2071-7296-2019-6-642-657
23. Константинов Ю.В. Методика расчёта сопротивления и момента сопротивления резанию почвы прямым пластинчатым ножом фрезы // Тракторы и сельхозмашины. 2019. Т. 86, № 5. С. 31–39. doi: 10.31992/0321-4443-2019-5-31-39
24. Кудзаев А.Б. Сравнение различных форм лезвия поступательно движущихся почвообрабатывающих рабочих органов // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 4. С. 337–349. doi: 10.17816/0321-4443-321315

REFERENCES

1. Rotary Cultivator Market-Industry Analysis and Forecast 2023-3039: by Blade, Power, End-User, and Region. [internet] Accessed: 6.11.2023. Available from: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-rotary-cultivator-market/71467/#>
2. Sexson BS. Land-Pulverizer. Patent US503006A. Patented August 8, 1893. Accessed: 7.11.2023. Available from: <https://patents.google.com/patent/US503006A/en>
3. Johnson CN, Stephenson WH, Nash JH. Rotor blade for rotary cultivators. Patent US2679200, Patented May 25, 1954. Accessed: 6.11.2023. Available from: <https://patents.google.com/patent/US2679200A/en>
4. Sakai J. Theoretical Approach to the Hand Tractor of Rotary Tillage. JARQ. 1974;8(3):153–158. Accessed: 8.11.2023. Available from: https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/08-3-153-158_0.pdf
5. Sakai J. Designing Process and Theories of Rotary Blades for Better Rotary Tillage (Part 1). JARQ. 1978;12(2):86–93. Accessed: 8.11.2023. Available from:

https://www.jircas.go.jp/sites/default/files/publication/jarq/12-2-086-093_0.pdf

6. Sakai J, Shibata J, Tagushi T. Design Theory of Edge-Curves for Rotary Blades of Tractors. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*. 1976;38(2):183–190. doi: 10.11357/jsam1937.38.183
7. Ju J-S, Luan J-M, Cheng C-W. Trajectory Angles and Cultivating Dynamics for Tiller Blades. *Journal of Agricultural Machinery*. 2004;13(1):1–15. doi: 10.30062/JAM.200403.0001
8. Mc Keys E. *Soil Cutting and Tillage*. New York: Elsevier. 1985.
9. Karmakar S. Numerical Modeling of Soil Flow and Pressure Distribution on a simple Tillage Tools using Computational Fluid Dynamics. [Internet]. Saskatoon: University of Saskatchewan. 2005. Accessed: 9.11.2023. Available from: https://harvest.usask.ca/bitstream/handle/10388/etd-10282005-081153/PhD_Thesis_KARMAKAR_Subrata.pdf?sequence=1&isAllowed=y
10. Aluko O.B. Finite element aided brittle fracture force estimation during two-dimensional soil cutting. *Int. Agrophysics*. 2008;22:5–15 Accessed: 8.11.2023. Available from: <http://www.international-agrophysics.org/pdf/106465-37307?filename=Finite%20element%20aided.pdf>
11. Hongbo Z, Hongwen L, Shaochun M, et al. The Effect of Various Edge-Curve Types of Plain-Straight Blades for Strip Tillage Seeding on Torque and soil Disturbance using DEM. *Soil and Tillage Research*. 2020;202:104674. doi: 10.1016/j.still.2020.104674
12. Chertkiattipol S, Nivamapa T. Variations of torque and specific tilling energy for different rotary blades. *International Agricultural Engineering Journal*. 2010;19(3):1–14. doi: 10.1016/j.still.2020.104674
13. Yuan Y, Wang J, Zhang X, Zhao S. Study on Tillage Resistance and Energy Consumption of a Plain straight Rotary Blade for Strip Tillage. *Engenharia Agrícola*. 2023;43. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43n2e20220127/2023
14. Goryachkin VP. *Theory of straw cutters and silage cutters. Collected works: in 3 vols.* Moscow: Kolos; 1968;3:68–113. (In Russ).

15. Goryachkin VP. *The theory of hand scissors and the basic principles of their construction. Collected works: in 3 vols.* Moscow: Kolos; 1968;3:120–133. (In Russ).
16. Reznik NE. *Blade cutting theory and basics of cutting tools calculation.* Moscow: Mashinostroenie; 1975. (In Russ).
17. Zybin YuP. *Tekhnologiya izdelij iz kozhi.* Moskva: Legkaya industriya; 1975. (In Russ).
18. Kravcova EV. Sovershenstvovanie apparata i processsa kvazistaticheskoy rezki plodoovoshchnogo syr'ya na chasti. [dissertation]. Sankt Peterburg; 2017. (In Russ.) Accessed: 8.11.2023. Available from: http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=173240
19. Kanarev FM. *Rotary tillage machines and implements.* Moscow: Mashinostroenie; 1983. (In Russ).
20. Gadzhiev PI, Slavkin VI, Alekseev AI, et al. Study of the work of a tillage cutter with a serrated blade of knives. *Vestnik FGOU VPO MGAU im VP Goryachkina*. 2020;1(95):14–18. (In Russ). doi: 10.34677/1728-7936-2020-1-14-18
21. Dranyaev SB, Chatkin MN, Koryavin SM. Modeling the operation of a screw L-shaped knife of a tiller. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2017;84(7):13–19. (In Russ). doi: 10.17816/0321-4443-66315
22. Nikolaev VA. Analysis of the cyclical ground cutting. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6):642–657. (In Russ). doi: 10.26518/2071-7296-2019-6-642-657
23. Konstantinov YU. Methods of calculating the resistance and the moment of resistance to cutting the soil with a straight blade knife cutter. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2019;86(5):31–39. (In Russ). doi: 10.31992/0321-4443-2019-5-31-39
24. Kudzaev AB. Comparison of different blade shapes of rectilinearly moving soil tillage tools. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(4):337–349. (In Russ). doi: 10.17816/0321-4443-321315

ОБ АВТОРАХ

* Кудзаев Анатолий Бештауович,

д-р техн. наук,
 профессор кафедры «Технические системы в агробизнесе»;
 адрес: Российская Федерация, Республика Северная Осетия-Алания, 362001, Владикавказ, ул. Кирова, д. 37;
 ORCID: 0000-0001-5973-9932;
 eLibrary SPIN: 2310-4400;
 e-mail: akudzaev@rambler.ru

Калагова Рита Владимировна,

д-р хим. наук,
 доцент кафедры «Химии и физики»;
 ORCID: 0000-0001-5973-9932;
 eLibrary SPIN: 2930-6180;
 e-mail: kudzaevaf@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

* Anatoly B. Kudzaev,

Dr. Sci. (Engineering),
 Professor of the Technical Systems in Agribusiness Department;
 address: 37 Kirova street, 362001 Vladikavkaz,
 Russian Federation;
 ORCID: 0000-0001-5973-9932;
 eLibrary SPIN: 2310-4400;
 e-mail: akudzaev@rambler.ru

Rita V. Kalagova,

Cand. Sci. (Chemistry),
 Associate Professor of the Chemistry and Physics Department;
 ORCID: 0000-0001-5973-9932;
 eLibrary SPIN: 2930-6180;
 e-mail: kudzaevaf@yandex.ru